

*На правах рукописи*



**КАПРАЛОВА Вероника Николаевна**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ В  
ПРЕДЕЛАХ ОЗЕРНО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН  
(НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОРФОЛОГИИ  
ЛАНДШАФТА)**

Специальность 25.00.36 – геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва

2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН)

**Научный руководитель:** **Викторов Алексей Сергеевич**  
*доктор географических наук, заместитель директора по научной работе ИГЭ РАН*

**Официальные оппоненты:** **Кравцова Валентина Ивановна**  
*доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*

**Перльштейн Георгий Захарович**  
*доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии ИГЭ РАН*


**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Кriosферы Земли СО РАН**

Защита диссертации состоится 14.03.2014 в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.002.048.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН) по адресу: 109004, Москва, ул. Николаямская, д. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН) по адресу: 101000, Москва, Уланский пер. 13, стр. 2.

Автореферат разослан 10.02.2014.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.002.048.01,  
кандидат  
геолого-минералогических наук

 Батрак Г.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Более 25% Земли находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород, при этом, значительная часть углеводородных месторождений также располагается в пределах этой зоны. Соответственно весьма актуальными являются геоэкологические проблемы выявления закономерностей развития экзогенных геологических процессов (прежде всего термокарста) в зоне распространения многолетнемерзлых пород для прогноза процессов и оценки риска поражения инженерных сооружений. Вероятностная оценка риска нужна, как правило, в момент проектирования сооружений. В этом случае при распространенном статистическом подходе к решению этой задачи, исследователь сталкивается с проблемой накопления статистики для конкретного типа природных условий. Оно требует значительного времени, которое зачастую сравнимо со временем функционирования сооружения. В силу этого актуально развитие альтернативных подходов к решению этой геоэкологической задачи. В качестве альтернативного подхода, позволяющего избежать подобных трудностей, предложены методы математической морфологии ландшафтов.

**Целью данной работы** является выявление и эмпирическое обоснование закономерностей развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин в различных физико-географических, геологических и геокриологических условиях на основе подходов математической морфологии ландшафта и обоснование способов их использования для оценки природных рисков.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- изучение закономерностей размеров и расположения термокарстовых очагов;
- исследование динамики размеров термокарстовых озер;
- обоснование и развитие методов для оценки опасности поражения различных инженерных сооружений;
- оценка воздействия различных природных факторов на закономерности распределения размеров и расположения озер.

**Фактическим материалом** диссертационной работы являются данные, полученные автором в результате камеральных и полевых исследований, проведенных в 2007 – 2012 годах, материалы космических съемок разных сроков среднего и высокого разрешения, а также геологические и геокриологические фондовые данные. Полевые исследования проводились в Забайкалье (Читинская область) и Ямало-Ненецком округе совместно с лабораторией геокриологии ИГЭ РАН. Часть исследований велась в рамках гранта РФФИ №12-05-31301, где автор выступал в качестве руководителя.

### **Защищаемые положения.**

1. Эмпирически обосновано, что размеры термокарстовых понижений в пределах однородных участков в различных физико-географических и геокриологических условиях имеют логнормальное распределение, а распределение числа термокарстовых понижений – пуассоновское распределение; факторы слияния и наличия сообщающихся озер существенно не влияют на вид распределения размеров.

2. Динамика изменения площадей термокарстовых озер в различных физико-географических и геокриологических условиях при малых временных интервалах, как показывает анализ эмпирических данных, может быть описана как нормальным, так и логнормальным распределением; это, связано с величиной интервалов, а также с гидрологически и геокриологически обусловленными колебаниями площади водной поверхности озер.

3. В разных физико-географических и геокриологических условиях вероятность поражения разных типов инженерных сооружений, согласно опытным данным, описывается на основе использования экспоненциального закона.

**Научная новизна** настоящей работы связана со следующими основными элементами:

- впервые проведено широкое эмпирическое обоснование закономерностей распределения размеров и расположения термокарстовых понижений в различных физико-географических и геокриологических условиях, проанализированы воздействия возможных осложняющих факторов;

- впервые на базе опытных данных выполнено исследование вероятностных моделей динамики размеров термокарстовых озер в разных физико-географических и геокриологических условиях;

- в разных физико-географических и геокриологических условиях проведена апробация аналитической оценки вероятности поражения инженерных сооружений разных типов, на основе параметров распределения, размеров и расположения термокарстовых очагов;

- впервые выявлено, что эмпирические данные по закономерностям распределения площадей термокарстовых понижений делают более вероятной гипотезу о преимущественно одновременном начале термокарстовых процессов, а также выявлено асинхронное изменение площадей озер в пределах однородных участков;

- получены новые фактические данные о размерах и расположении термокарстовых очагов и их динамике в разных физико-географических и геокриологических условиях.

**Практическая ценность.** В практическом отношении проведенное исследование позволяет получить новые методы решения следующих задач:

- количественная оценка природных опасностей и риска для различных инженерных сооружений применительно к термокарстовым процессам;
- прогнозирование развития озерного термокарста;
- совершенствование геоэкологической оценки территорий развития термокарстовых процессов;
- разработка новых методов интерпретации материалов дистанционных съемок.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации автором лично и в соавторстве подготовлено 35 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, 8 статей в зарубежных изданиях. Результаты и основные защищаемые положения работы докладывались на 4 всероссийских и 14 международных конференциях, в том числе: Сергеевские чтения 2008, 2013; Regional Conference of the International Association of Geomorphologists IV, Svalbard 2007, 33-й и 34-й Международные геологические конгрессы (Норвегия 2008, Австралия 2012); International Conference “Four Dimensions of Landscape”, Warsaw, 2011; Международная научно-практическая конференция по проблемам снижения природных опасностей и рисков (ГЕОРИСК-2012) Москва, 2012; Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (TICOP), Салехард, 2012; Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы, Москва, 2013; International Conference «Earth Cryology: XXI Century», Pushchino, 2013; International Geographical Union Regional Congress, Japan, 2013.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю А.С. Викторову, директору ИГЭ РАН академику В.И. Осипову, сотрудникам лаборатории дистанционного мониторинга геологической среды ИГЭ РАН О.Н. Трапезниковой, М.В. Архиповой, Т.В. Орлову, А.А. Викторову, П.В. Березину, Б.В. Георгиевскому, А.В. Звереву, С.А. Садкову, сотрудникам института Н.А. Румянцевой, Д.О. Сергееву и сотруднику кафедры геокриологии геологического факультета МГУ В.Е. Тумскому.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем работы составляет 107 страниц, включая 24 рисунка и 22 таблицы; библиографический список включает 91 наименование.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Глава I. Современное состояние изучения развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин.** Современное состояние изучения развития морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин тесно связано с изученностью термокарстового процесса в целом. Озерный термокарст является одной из основных и наиболее распространенных форм криогенных процессов и

сопровождается заполнением образовавшегося замкнутого понижения водой. Как правило, главным фактором развития термокарста считается наличие мерзлых пород с большим содержанием льда, а главными причинами — изменение условий теплообмена на поверхности грунта и увеличение глубины сезонного протаивания (Кудрявцев, 1958; Качурин, 1959, 1961; Шур, 1977 и др.). Образование первичного термокарстового озера начинается с заложения небольшого понижения (Кудрявцев, 1958; Мухин, 1974 и др.) под действием комплекса причин, основной из которых является накопление некоторого критического столба воды, после чего развивается направленный процесс деградации многолетнемерзлых пород (Perlstein, Levashov, Sergeev, 2005). В последующем наряду с углублением понижения происходит рост его размеров за счет не только чисто термических, но и термоабразионных процессов.

Изучению термокарстовых процессов посвящены многие работы. Исследования велись на севере Европейской части России (Ю.Т. Уваркин, Т.Ф. Иванова, Л.Г. Хохлова и др.), в Западной Сибири (А.И. Попов, В.Т. Трофимов, В.В. Баулин, Е.Б. Белопухова и др.), в Восточной Сибири (Н.Н. Романовский, Н.И. Мухин, С.В. Томирдиаро, Ф.Э. Арэ, В.Е. Тумской и др.). Изучался термокарст и за рубежом: в Канаде (С.Р. Burn, М.В. Smith, J.R. Mackay, J.B. Murton, S.R. Dallimore и др.), в Германии (А. Morgenstern, F. Gunther, P. Overduin, Th. Opel, и др.), в США (G. Grosse, E.A.G. Schuur, C. Hofle, С.-L. Ping, S.L. Forman и др.) и т.д.

Существуют разные взгляды на историю возникновения термокарстовых озер. Большинство исследователей (Качурин, 1961; Романовский, 1961; Попов, 1967; Каплина, Ложкин 1979, 1985 и др.) считают, что развитие термокарста произошло массово на границе позднего плейстоцена и голоцена, из-за общего потепления климата и в настоящее время он развивается лишь на отдельных участках (Каплина, 1981), ряд исследователей рассматривает термокарст как многоэтапный процесс (Стрелецкая, Туркина, 1987; Воскресенский, 1999).

Влияние факторов развития термокарстовых озер оценивалось многими исследователями: рельеф (Качурин, 1961, Романовский, 1977 и др.), климат, осадки (Uvarkin, Shamanova, 1973; Босиков, 1989 и др.), снежный покров (Кудрявцев, 1958; Методика..., 1979 и др.), почвенно-растительный покров (Кирикова, Осадчая, 1998, Скрябин, 1979; Арэ, 1974; Рябчун, 1966; Томирдиаро, Рябчун, 1974; Качурин, 1961, Москаленко, 1999 и др.), тектоника (Кудрявцев, 1954; Дьяконов, 1958; Попов, 1967; Баулин, 1966, 1970; Баулин и др, 1970; Белопухова, 1971; Белопухова, Данилова, 1974 и др.) и прочих.

Важной задачей является прогнозирование термокарстового процесса. В большинстве работ решаются тепловые и теплофизические задачи для расчета таликовой зоны. Расчеты по оценочным формулам (Кудрявцев, 1958; Балобаев,

Шасткевич, 1974; Гречищев и др., 1980; Томирдиаро, 1972 и др.) обычно проводятся для неизменных внешних условий. Другая часть работ ориентирована на моделирование термокарста в реальных условиях и прогнозе развития в будущем на основе задачи Стефана (Гречищев и др., 1980; Фельдман, 1984; Григорян, Красс и др., 1987 и др.).

В.Е. Тумской (2000, 2002) провел математическое моделирование протаивания отложений ледового комплекса и формирования подозерных таликов с целью изучения современного состояния верхних горизонтов криолитозоны и уточнения времени начала развития озерного термокарста.

Однако экспериментальные исследования оттаивания мерзлых грунтов показывают, что даже при одинаковых параметрах, нет единой картины протекания данных процессов (Глаговский, Нуллер, 1998).

В конце прошлого - начале текущего столетия, с ростом доступности данных дистанционного зондирования, методы изучения динамики термокарстовых озер с помощью аэро- и космических снимков получили новый импульс. По разновременным снимкам фиксировались изменения площадей озер, классифицировались по типу многолетнемерзлых пород (ММП) и делались прогнозы дальнейшего развития территории - для территории Аляски (Fitzgerald, Riordan, 2003, Grosse et al., 2013), Западной Сибири (Smith et al., 2005, Днепровская, Полищук, 2008; Кирпотин и др., 2008; Кравцова, Тарасенко, 2009), всей криолитозоны России (Кравцова, Быстрова, 2009). При этом исследователи получили различные, не согласующиеся друг с другом результаты по динамике водной поверхности озер в зависимости от типа ММП.

Специфика настоящей диссертационной работы связана с использованием подходов, основанных на анализе количественных характеристик морфологических структур (ландшафтных рисунков). Разнообразные исследования количественных характеристик морфологических структур выполнялись в работах многих специалистов (K.Ritters, R.O'Nill, C.Hunsaker, N.Vogt и др.). Однако они ограничиваются обычно поиском корреляций между отдельными количественными характеристиками названных структур и, кроме того, не касаются термокарстовых равнин.

В.Ю. Полищук и Ю.М. Полищук (2013) с помощью данных дистанционного зондирования исследовались поля термокарстовых озер для разработки модели их пространственно-временной структуры. Ими была предложена фактически эмпирическая модель динамики полей термокарстовых озёр, учитывающая экспериментально установленные статистические свойства случайных полей термокарстовых озер. При этом не учитывалась однородность территории, не был произведён анализ корректности определения генетического типа озер и пр.

В ряде работ А.С.Викторова (1995; 1998; 2006) были выполнены исследования по созданию теоретической модели, описывающей строение и развитие морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в рамках обособленного научного направления – математической морфологии ландшафта. Методы математической морфологии ландшафта подразумевают создание математических моделей морфологических структур, позволяющие для обширных генетических типов рисунков вести теоретико-математический анализ изменения большой совокупности показателей рисунков, предсказывать их поведение, прогнозировать информативность, анализировать их предельные (равновесные) состояния. Значительное внимание в исследованиях уделено разработке теоретической задачи оценки рисков поражения инженерных сооружений на основе предложенных моделей развития термокарстовых очагов.

В исследованиях было предпринято первичное эмпирическое обоснование полученных выводов. Однако не была проведена широкая проверка полученных выводов для различных физико-географических, геологических и геокриологических условий, не предпринимались попытки отслеживания динамики морфологической структуры термокарстовых равнин. Проводились лишь единичные заверки метода для обоснования оценки опасности поражения различных инженерных сооружений.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

- изучение закономерностей размеров и расположения термокарстовых очагов требует рассмотрения в различных физико-географических и геокриологических условиях на широком эмпирическом материале;
- самостоятельный интерес представляет изучение динамики термокарстовых озер на коротких (порядка нескольких десятков лет) интервалах;
- оценка опасности поражения различных инженерных сооружений на основе анализа динамики термокарстовых очагов требует дополнительного опытного обоснования.

## **Глава II. Статические закономерности пространственных структур термокарстовых очагов озерно-термокарстовых равнин.**

*Базовая модель озерно-термокарстовых равнин.* Для анализа закономерностей пространственного строения и динамики озер нами были использованы методы математической морфологии ландшафта. Подходы математической морфологии ландшафта позволяют исследовать количественные закономерности построения мозаик, образованных природно-территориальными комплексами на земной поверхности и способы математического анализа этих мозаик (Викторов, 1998).

В основу исследования была положена математическая модель морфологического строения озерно-термокарстовых равнин, базирующаяся на использовании



математических зависимостей, между основными геометрическими характеристиками ландшафтного рисунка. Как правило, математическая модель строится на ряде предположений и имеет вид совокупности выражений, описывающих поведение основных количественных характеристик рисунка, образованного экзогенным процессом на земной поверхности. Данные выражения независимы, не могут быть выведены друг из друга и, вследствие этого, выступают как взаимно дополняющие. В итоге, какие-то черты рисунка остаются схематизированными, поскольку набор этих характеристик определяет рисунок лишь с известной полнотой. В настоящее время разработан ряд канонических математических моделей морфологических структур, сформировавшихся под действием одного процесса в однородных физико-географических условиях (Викторов, 1998, 2006).

При использовании предлагаемого подхода задачи решаются для однородного участка, поэтому при применении методов математической морфологии ландшафта мы пытаемся добиться относительной однородности территории путем деления ее на однотипные участки по условиям протекания процессов. Озерно-термокарстовые равнины, как правило, представляют собой слабоволнистую субгоризонтальную поверхность с беспорядочно разбросанными озерными понижениями. Озера имеют изометричную, часто округлую форму и могут рассматриваться как очаги развития термокарстового процесса (рис. 1).

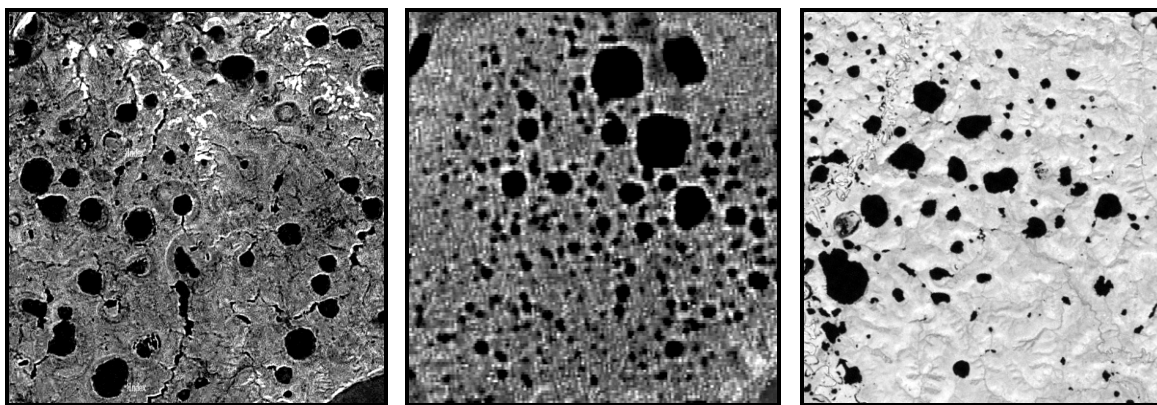


Рис. 1. Типичное изображение озерно-термокарстовой равнины на материалах космической съемки.

В рамках настоящей модели рассматривалась упрощенная схема возникновения и развития понижений, согласно ей, одним из основных процессов развития озерно-термокарстовой равнины являлся процесс возникновения термокарстовых понижений. Генерация понижений происходила под действием комплекса причин, основной из которых является накопление некоторой критической мощности воды, после чего начинается необратимый процесс деградации многолетнемерзлых пород (Perlstein et al, 2005). После появления термокарстового очага, наряду с углублением

понижения происходит рост его размеров за счет не только термоденудационных, но и термоабразионных, и других процессов, при этом происходит деградация мерзлоты по берегам озера с их периодическим обрушением.

Рассмотрим два варианта модели морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин в соответствии с существующими представлениями:

- модель равнин с синхронным стартом термокарстовых процессов;
- модель равнин с асинхронным стартом термокарстовых процессов.

В основу *модели равнин с синхронным стартом термокарстовых процессов* могут быть положены следующие предположения (Викторов, 1995, 1998, 2006):

1. Процесс появления первичных понижений является вероятностным и на непересекающихся площадках идет независимо.

Данное предположение подразумевает, что в разных геологических и климатических условиях, не наблюдалось сколько-нибудь ярко выраженного механизма взаимозависимости появления двух разных термокарстовых озер.

2. Генерация термокарстовых понижений произошла одновременно, вероятность возникновения понижений на пробной площадке зависит только от ее площади и для малых площадок вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.

В данном предположении постулируется синхронность старта термокарстовых процессов, и, сравнительная редкость возникновения озер (предположение исключает существование площадок, на которых имеется бесконечное количество озер).

3. Рост размеров озер, благодаря термоабразионному воздействию, происходит независимо друг от друга, и его скорость прямо пропорциональна запасам тепла в озере и обратно пропорциональна площади боковой поверхности озерной котловины.

Предположение исходит из того, что термическое воздействие пропорционально средней величине теплового потока, проходящего через единицу площади боковой поверхности озерной котловины. Это предположение справедливо, даже если боковая поверхность не вся покрыта водой, и если рост озер происходит не каждый год (в случае, когда водное зеркало уменьшено и не доходит до борта котловины и термоабразия не развивается). В данном предположении считается постоянной доля запасов тепла, идущая через боковую поверхность. Связь озер протоками мы считаем слабой и пренебрегаем ее воздействием на протекание процессов.

«Идеальная» территория, к которой относится развитая математическая модель с господством термокарстовых процессов, представляет собой однородную в ландшафтном, геологическом и геокриологическом отношении равнину, практически незатронутой эрозией, с расположенными на ней озерами округлой формы. В реальных условиях, такую территорию можно встретить на плоских водоразделах,

морских и аллювиальных террасах.

**Описание участков исследования.** При исследовании закономерностей строения термокарстовых равнин изучение было сосредоточено на ряде эталонных участков (площадью от 4 до 230 км<sup>2</sup>, средняя площадь озер на участках от 0,01 до 0,6 км<sup>2</sup>). При выборе участков, мы руководствовались следующими критериями:

- геолого-геоморфологическая однородность участка (генетическая и морфологическая однородность, однотипность состава поверхностных отложений, обоснованная фондовыми и литературными данными);
- морфологическая однородность изображения участка (внутреннее однообразие участка по микроструктуре и фототону фона на космоснимках, а также по расположению и форме озер);
- наличие данных дистанционного зондирования необходимого разрешения;
- разнообразие геологических, геокриологических и климатических условий, в которых находятся разные участки.

При отнесении озер к термокарстовым использовались известные дешифровочные признаки на материалах дистанционных съемок («Методические рекомендации по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000», 1976).

Для исследования использовались материалы с разных спутников (Landsat (MSS, TM, ETM), SPOT, IRS и др.) с различным разрешением (от 5,8 м до 60 м).

Краткая характеристика участков приведена в таблице 1.

### **2.3. Закономерности распределения размеров термокарстовых очагов озерно-термокарстовых равнин**

Одним из элементов нашего исследования являлось исследование распределений характеристик озер (диаметр, площадь) в различных физико-географических условиях. Как показано аналитически (Викторов, 1995, 2006), из принятых предположений модели с синхронным стартом вытекает, что распределение площадей и размеров термокарстовых озер в любой момент времени должно подчиняться логнормальному распределению, при этом возможны различные значения его параметров:

$$f_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}\sqrt{t}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\sigma$  – параметры распределения,  $t$  – возраст озера.

В основу проверки была в большинстве случаев положена следующая методика. Озера на изучаемых участках были оцифрованы в специально разработанной программе «Векторизатор» (автор А.А.Викторов). Водная поверхность озер довольно

Таблица 1. Краткая характеристика участков.

Уч. №	Название	Район	Ср.год. t		Мощн. ММП (м)	Ср.год. кол-во осадков (мм)	Характеристика участков
			Возд. °С	Пород °С			
1	Валоктаягун 1	Среднеобская низм., в районе р. Валоктаягун	-4,4	-0,1	до 5	600	Плоская водораздельная поверхность сложена флювиогляциальными песчаными породами (льди́стостью до 40%), перекрытыми торфом (льдо́насыщенность до 90%). Редкоостровное распространение ММП.
4	Валоктаягун 2						
2	Аляска 1	Аляска, дельта р. Серпентин, п-ов Сьюард	- 6	- 3	5-60	370-450	Аллювиально-аккумулятивная поверхность сложена с поверхности пылеватыми супесями и песками мощностью до 3-8 м, подстилаемыми песчано-гравийной толщей, отложения оторфованы. Прерывистое распространение ММП.
3	Пякупур	Среднеобская низм., р. Пякупур и р. Вынгапур	-7	-2	50	410-460	Плоская водораздельная поверхность сложена озерно-аллювиальными разнотернистыми песками, перекрытыми биогенными отложениями. Прерывистое распространение ММП.
5	Вынгапур						
6	Лена 1	В районе дельты р. Лена, п. Чай-Тумус	-13	-11	500 - 700	200-250	Третья надпойменная терраса сложена льдистыми толщами супесей и суглинков, включающих многочисленные и протяженные по вертикали тела повторно-жильного льда (ледовый комплекс). Сплошное распространение ММП, льди́стость 50—60%.
7	Лена 2						
8	Гыданский	Гыданский п-ов	-11	-9	300 - 400	350	Прибрежно-морская равнина сложена флювиогляциальными слоистыми песками, мелкозернистыми пылеватыми. Сплошное распространение ММП.
9	Ямал 1	П-ов Ямал, р. Турмаяха	- 9	-6	200-280	400	Третья лагунно-морская терраса сложена песками мелкозернистыми пылеватыми, с редкими прослоями суглинков. Сплошное распространение ММП.
10	Ямал 2	П-ов Ямал, п. Усть-Юрибей	-8	-3	150-250	300-400	Третья морская терраса, плоская, заболоченная, сложена песчаными или песчано-суглинистыми отложениями. Сплошное распространение ММП.
11	Аляска 2	Аляска, долина реки Мид	-12	-6,5	200 - 300	175	Плоская равнина сложена оторфованным суглинком и однородными мелкозернистыми песками высокой льди́стости флювиогляциального генезиса. Сплошное распространение ММП.
12	Канада	Канада, Б. Невольничье озеро	- 5	-2	до 30	340	Низменная равнина сложена морскими глинами, широко распространены бугристые и грядовые болота с торфяной толщей мощностью до 3 м. Прерывистое распространение ММП, льди́стость 10%.

контрастна по отношению к окружающей среде и хорошо дешифрируема визуально. «Векторизатор» позволяет привести изображение к бинарному виду, после чего оператором, на увеличенном фрагменте изображения, определяется и выделяется граница озера в полуавтоматическом режиме. Далее с помощью программы вычисляются диаметр, площадь, периметр, расположение центра тяжести и другие параметры контура. После этого, в программе «STATISTICA StatSoft Inc.» определяются значения теоретической функции распределения и согласие теоретического и эмпирического распределений по критерию Пирсона. Согласно методике определения критерия Пирсона, выборка программно разбивалась на интервалы. Критерием разбиения было наличие в интервале не менее пяти значений из выборки, если это условие не выполнялось, то интервалы программно укрупнялись за счет слияния соседних. Выборка сопоставлялась, прежде всего, с логнормальным распределением.

Для ряда участков имелись данные дистанционного зондирования разных лет. В этом случае исследование проводилось для каждого года (отдельная выборка). Общее количество выборок составило 26.

В первую очередь были рассмотрены простейшие в морфологическом отношении участки (участки 6, 7, 8). На данных участках представлено большое количество округлых озер, практически не затронутых эрозией и слиянием. Объем выборки составил 91 озеро на участке 6, 135 озер на участке 7 и 154 озера на участке 12. Исследование показало хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 (6 из 6 выборок). На рисунке 2 приведен пример графического отображения теоретической и экспериментальной кривых для участка 7.

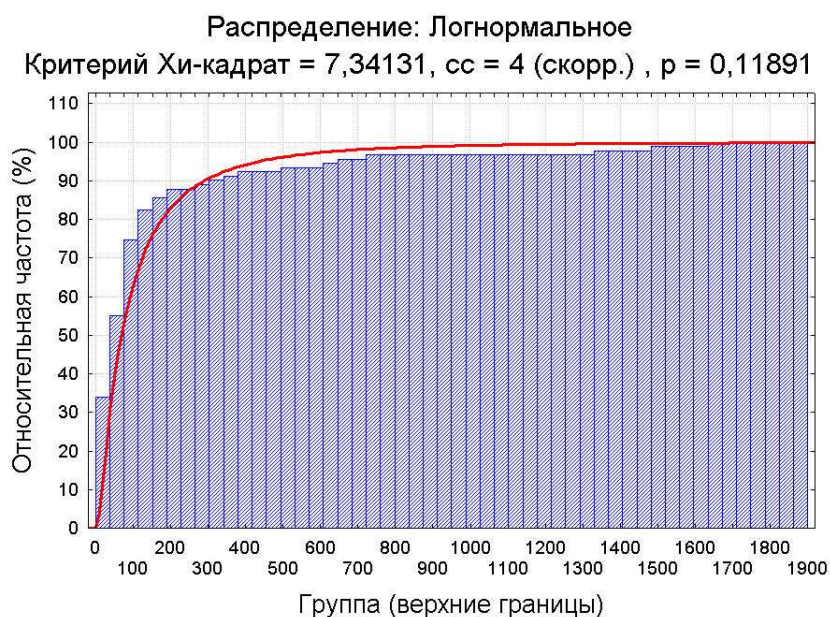


Рис.2. Соответствие теоретической и экспериментальной кривой для участка 7.

Гораздо чаще встречаются территории, где помимо округлых озер присутствуют озера сложной формы (участки с 1 по 5). Согласно предположениям модели (Викторов, 2006), сложная форма озер не должна влиять на вид распределения. Участки, на которых проводились исследования, расположены на Западно-Сибирской равнине, в районе рек Пякупур и Валоктаягун и на Аляске (п-ов Сьюард). На участках было оцифровано от 78 озер (участок 4) до 214 озер (участок 3). Исследование на участках показало хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 (14 из 14; на уровне 0.95 - 5 из 14).

На данных участках, помимо озер сложной формы, представлено некоторое количество озер, которые получаются в результате слияния соседних, их форма, как правило, носит следы слияния («восьмерки» и др.) и выделяется визуально на снимке. При слиянии меняются отдельные параметры озера (такие как площадь, расположение центра озера, плотность озер на площадке и пр.). Чтобы увидеть, как видоизменяется распределение, и как сильно на него влияет слияние озер, из выборки нами были исключены все слившиеся озера. Анализ результатов показал хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 (14 из 14; на уровне 0.95 - 11 из 14). Таким образом, исключение из выборок слившихся озер, привело в целом к улучшению результата.

Довольно часто озера сообщаются между собой протоками. Если протоки приводят к спуску озер и образованию хасыреев, то, согласно исследованиям (Викторов, 1998, 2006), распределение размеров очагов меняется на распределение Рэлея. Участки 9 и 10 представляют собой территории с округлыми озерами, практически без слившихся озер и без озер сложной формы, но почти все озера связаны между собой небольшими водотоками, которые, однако, не приводят к спуску водоемов с последующим образованием хасыреев. Участки расположены в Ямало-Ненецком автономном округе, на п-ове Ямал со стороны Байдарацкой губы, недалеко от поселка Усть-Юрибей (участок 10) и со стороны Обской губы, в долине реки Турмаяха (участок 9). Исследование на участках показало хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 и 0.95 (2 из 2). Таким образом, наличие проток между озерами, не ведущее к их спуску, видимо, незначительно влияет на вид распределения.

Представляет самостоятельный интерес, как будут вести себя предложенные закономерности на территории, где прослеживается общая ориентация озер. Рост озер на таких участках происходит не равномерно во все стороны, а, вероятно, преимущественно по направлению летних ветров, обеспечивавших более интенсивное развитие термоабразии какого-то одного берега. В качестве

исследуемого участка, была использована территория, расположенная на Аляске (участок 11). Исследование на участке показало хорошее соответствие логнормальному распределению с доверительной вероятностью 0.99 (4 из 4). Таким образом, можно сделать вывод, что на данном участке ветра не оказывают сильного влияния на вид распределения.

Существуют иные представления о закономерности распределения размеров очагов озерно-термокарстовых равнин. Согласно исследованиям В.Ю. Полищука и Ю.М. Полищука (2013), диаметры озер подчиняются экспоненциальному распределению. Этот вывод был получен авторами эмпирически и теоретически не обосновывался. Мы провели исследование на подчинение размеров озер наших участков экспоненциальному распределению. Анализ показывает соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.95 в 2 случаях из 26 и 5 из 26 с доверительной вероятностью 0.99. Согласие на уровне значимости 0.95 есть на участках 2 и 4. Возможно, этому способствует большое количество мелких озер на данных участках. Таким образом, исследование на наших участках отличается от результата, полученного В.Ю. Полищуком. Это может быть связано с тем, что автором выбирались все озера в пределах довольно обширной территории (в среднем 2800 км<sup>2</sup>), в то время как не все они отвечают общепринятым дешифровочным признакам, указывающим на термокарстовое происхождение, кроме того, на территории имеющей такую площадь, сложно обеспечить однородность условий.

Исследования закономерностей размеров очагов озерно-термокарстовых равнин проводились и другими исследователями (Burn, 1991; Томирдиаро, 1998; Арэ, 1985). Согласно их работам, скорость роста озер в ширину (при условии однородности залегающих мерзлых пород) происходит примерно с постоянной скоростью, испытывая лишь случайные колебания. Данное предположение, по сути, означает, что мы предполагаем, что приращение размера озера за каждый год представляет собой независимую случайную величину. Отсюда было получено (Викторов, 2006), используя центральную предельную теорему, что в любой момент времени средние размеры озера должны подчиняться нормальному распределению. Рассмотрение выбранных нами участков на соответствие этой гипотезе показало отсутствие соответствия нормальному распределению на всех участках (для исследования использовались средние диаметры озер). На рис. 3 для примера, приведен график сравнения распределений для участка 9. Исключение слившихся озер также не привело к улучшению результата. Видимо эта ситуация требует дальнейшего анализа.

Анализ графика показывает, что наиболее близка к теоретической кривой распределения кривая логнормального распределения площадей озер.

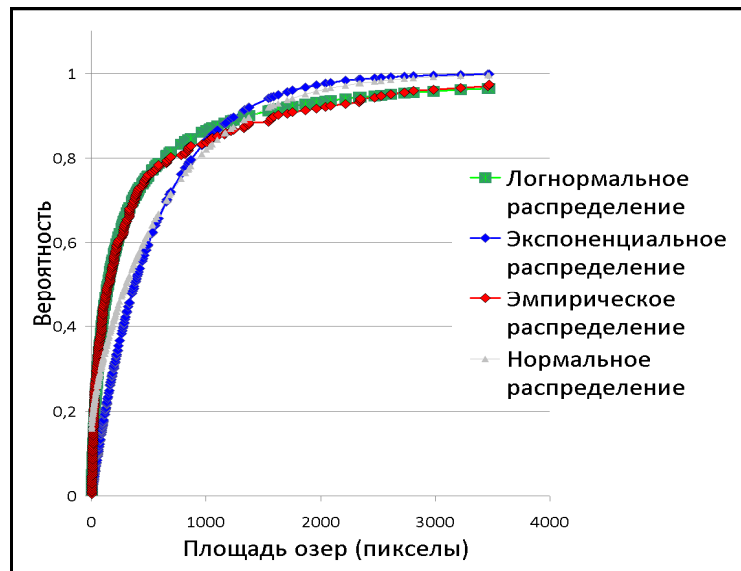


Рис.3 График сравнения разных распределений для участка 9.

Наряду с базовой моделью была дополнительно исследована *модель морфологической структуры равнин с асинхронным стартом термокарстовых процессов*. В основу модели были положены следующие предположения, отличающиеся от предположений модели синхронного старта первыми двумя пунктами:

- 1) Возникновение термокарстовых понижений является вероятностным и на непересекающихся площадках, а также в неперекрывающиеся отрезки времени идет независимо и постоянно,
- 2) Вероятность возникновения понижений на пробной площадке зависит только от ее площади и величины рассматриваемого временного интервала, и вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений,
- 3) Рост размеров озер благодаря термоабразионному воздействию, происходит независимо друг от друга, и он прямо пропорционален запасам тепла в озере и обратно пропорционален площади боковой поверхности озерной котловины.

Данные предположение вытекают из однородности рассматриваемой территории и отражают постоянство возникновения термокарстовых понижений, т.е исходят из того, что озера не имеют выраженного пика (или пиков) старта процесса, а появлялись и продолжают появляться равномерно во времени.

Из модели асинхронного старта следует (Викторов, 2006), что в отдельный момент времени, площади озер должны подчиняться распределению отличному от логнормального. То есть по прошествии достаточного большего времени,

$$F_r(x) = \frac{\ln x - \ln a}{\ln b - \ln a}, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  – параметры распределения.



Были проведены исследования на соответствие данному распределению озер на выбранных участках. На первом этапе рассматривались все озера на участках.

Исследование на участках показало, что из 26 выборок, шесть проходят на уровне значимости 0.99 (на уровне 0.95 - 5 из 26). Соответствие распределению в той или иной степени наблюдается на 4 из 12 участков (участки 2, 4, 5, 9). На исследуемых участках, также представлено некоторое количество озер, которые получаются в результате слияния, при котором меняются отдельные параметры озера (такие как площадь, расположение центра озера, плотность озер на площадке и пр.). Чтобы увидеть, как сильно на вид распределения влияет слияние озер, из выборки нами были исключены такие озера, что привело к незначительному улучшению результата (6 из 21). Соответствие наблюдается на тех же участках.

Анализ представленных материалов показывает, что для выбранных участков наиболее часто реализуется вариант с синхронным стартом термокарстовых процессов (8 участков из 12), а на 4 участках, видимо, это требует дальнейшего рассмотрения. В то же время наблюдающееся местами на снимках расположение новых небольших термокарстовых озер в пределах хасыреев указывает на то, что вариант с асинхронным стартом также вполне реален.

#### **2.4. Закономерности расположения термокарстовых очагов озерно-термокарстовых равнин**

Другим элементом исследований было изучение планового расположения озер. Аналитически было получено (Викторов, 1998, 2006), что исходя из вышеперечисленных положений, на однородных территориях с развитием термокарстовых процессов, независимо от климатических, геологических, физико-географических и геокриологических условий, пространственное расположение озер на случайно выбранной площадке должно подчиняться распределению Пуассона (независимо от того, синхронным или асинхронным был старт термокарстовых процессов), то есть распределение числа озер на площадке дается выражением,

$$P(k, t) = \frac{[\gamma(t)s]^k}{k!} e^{-\gamma(t)s} \quad (3)$$

где  $\gamma(t)$  - среднее число понижений на единицу площади в момент времени  $t$ ,  $s$  - площадь пробной площадки.

Измерения распределения центров проводилось на тех же эталонных участках. Для этого в программе «Векторизатор», выделялась область с оцифрованными озерами, и, с помощью специального программного модуля, производился подсчет количества центров озер, попадающих на случайно выбранную (с помощью датчика случайных чисел) площадку (в данном случае – круга), постоянного размера. Для каждого участка было проведено несколько серий экспериментов, с кругами разной площади.

Для большинства участков анализ результатов показывает хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 (99 из 101; на уровне значимости 0,95 - 78 из 101). При рассмотрении участка 11, где рост озер происходит не равномерно во все стороны, а, видимо, преимущественно по направлению ветров, мы получили весьма пеструю картину: из 25 выборок 12 отвечают гипотезе на уровне значимости 0.95 (0.99), и 13 не показывают согласия с предложенной гипотезой. Возможно, это объясняется тем, что при росте озера равномерно во все стороны, центр озера примерно сохраняет свое местоположение, в варианте же роста в одну сторону, центр озера постоянно перемещается.

Кроме этого, был проведен анализ расположения озер, сформировавшихся в связи с развитием полигонально-жильных льдов и соответственно размещенных по полигональной решетке. Если следовать построениям модели, озера, расположенные по полигональной решетке не должны подчиняться распределению Пуассона, так как появление их не равновероятно на участках равной площади, а зависит от положения на полигональной решетке. Исследование на участках показало отсутствие соответствия пуассоновскому распределению на всех участках.

Аналогичные результаты получили другие исследователи (Полищук, 2013; Каган, Кривоногова, 1998). У В.Ю. Полищука экспериментально получилось, что на выбранных им участках, распределение координат центров озер на плоскости соответствует закону равномерной плотности, что согласуется с нашим предположением: нахождение центров озер на равных площадях, с равной вероятностью. А.А. Каган и Н.Ф. Кривоногова в одной из своих работ (1998) также сделали теоретическое предположение о пуассоновском распределении центров термокарстовых озер.

Таким образом, одно из базовых положений предлагаемой математической модели в целом подтверждается опытными данными.

### **Глава III. Закономерности динамики пространственных структур термокарстовых очагов озерно-термокарстовых равнин**

Вторая задача диссертационной работы была посвящена исследованию динамики площадей термокарстовых озер за относительно короткие периоды, порядка несколько десятков лет.

Для исследования закономерности динамики морфологических структур, связанных с термокарстом, необходимо иметь повторные снимки на одну территорию, сделанные в летний период года в близком временном интервале. На всех территориях изучения довольно короткий период положительных температур с отсутствием снежного покрова, поэтому при поиске данных дистанционного зондирования, мы столкнулись с определенными проблемами, такими как отсутствие

снимков приемлемого разрешения, снимков надлежащего качества (облачность), и пр. Таким образом, исследование закономерности динамики было проведено не на всех участках. Были выбраны участки (табл. 1): 3 (Пякупур), 5 (Вынгапур), 1 и 4 (Валоктоягун 1, 2), 8 (Гыданский) и 11 (Аляска 2). Данные ДДЗ имели максимальный интервал между съемками 28 лет, минимальный 4 года.

Из модели морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин (Викторов, 1998, 2006) следует, что отношение диаметров котловин термокарстовых озер за разные сроки ( $t_1, t_2$ ) должно отвечать логнормальному распределению. То есть, если в начальный рассматриваемый момент времени очаг термокарстового процесса имеет размеры  $x_1$ , а в следующий, через время  $t$  -  $x_2$ , то распределение размеров очага дается формулой

$$f(x_1, x_2, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x_2} \sqrt{t}} e^{-\frac{(\ln x_2 - \ln x_1 - at)^2}{2\sigma^2 t}}, \quad (4)$$

где  $\alpha, \sigma$  – параметры распределения,  $t$  – время.

Для проведения названных исследований озера были оцифрованы в программе «Векторизатор», далее были получены данные о площади озер, диаметрах и периметрах. Затем, в программе «STATISTICA» определялись значения теоретической функции распределения и согласие теоретического и эмпирического распределений по критерию Пирсона.

С целью обоснования значимости контролируемых изменений была произведена оценка ошибки дешифрирования. Для вычисления ошибки, проводились многократные независимые измерения озер разной площади, в качестве предельной ошибки дешифрирования было взято двойное среднеквадратическое отклонение. После анализа величин ошибок для различных озер для оценки предельной ошибки при измерении озер разной площади была использована линейная зависимость. Анализ показал, что значительная часть полученных данных об изменениях площади находится за пределами ошибки, даже при такой завышенной ее оценке.

Дополнительные данные дало сопоставление динамики различных озер за исследуемый период. Нами брались озера на одну территорию за 4 срока: 1973, 1987, 2001, 2007 года. На рисунке 4 приведена динамика различных озер на одной территории, она имеет асинхронный характер. Разное поведение озер на одной площадке, позволяет исключить влияние на площадь озер метеорологических условий в конкретный год.

Размеры котловины активного термокарстового озера могут только увеличиваться, в то время как площадь «зеркала» водной поверхности озер, может как уменьшаться,

так и расти. Колебания водного зеркала озера могут вносить отклонения в выборку при исследовании динамики на коротких промежутках.

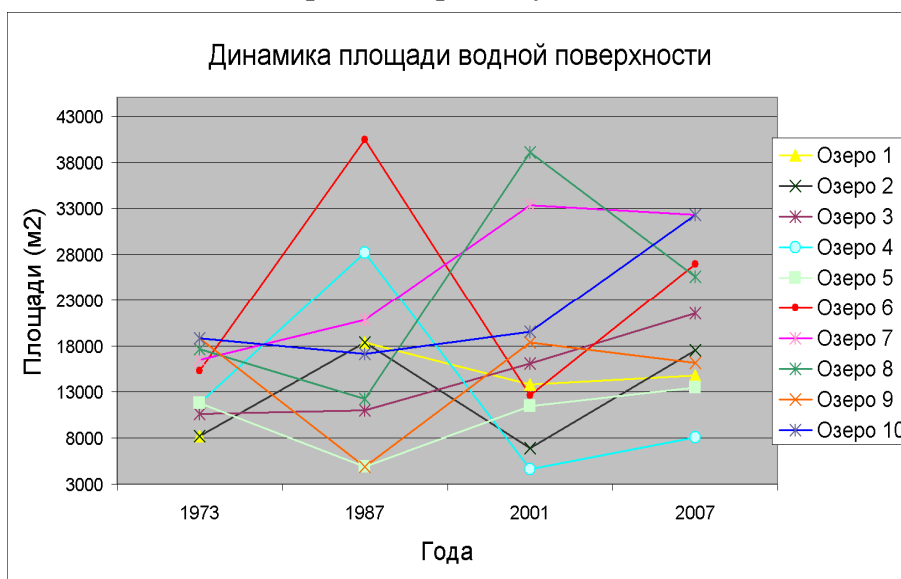


Рис.4 Динамика площади водной поверхности озер за разные сроки (участок 3).

Интересен тот факт, что помимо небольших по амплитуде пульсаций зеркала воды в озерах, на некоторых участках наблюдаются изменения довольно существенные, с практически полным осушением озерной котловины с последующим ее наполнением (такие озера были предварительно исключены из выборки). Возможно, такие колебания можно объяснить климатическими причинами, морфологией конкретных озерных котловин и взаимодействием поверхностного и подземного стока. Также была проведена проверка наличия связи между величиной колебания водной поверхности и размеров озера. Анализ показал, что озера небольших и средних размеров подвержены более сильным колебаниям.

Исследование показало хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных на уровне 0.99 (14 из 15; на уровне 0.95 - 8 из 15).

Чтобы увидеть, как видоизменяется распределение и как сильно на него влияет слияние озер, из выборок нами были исключены все слившиеся озера. Это привело к незначительному улучшению результата: мы получили хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 (14 из 15; на уровне 0.95 - 10 из 15).

Отдельно был рассмотрен участок 11, где рост озер происходил не равномерно во все стороны, а в одном направлении. Соответствие предполагаемой гипотезе наблюдается всего на одном сроке, исключение слившихся озер к улучшению результата не привело. При этом, изучая статистические закономерности, мы получили хорошее соответствие логнормальному распределению с доверительной вероятностью 0.99 (см. главу 2). Возможно, это связано с тем, что на небольших временных промежутках рост озер идет несколько иначе, приближаясь к

логнормальному распределению при рассмотрении общего временного интервала существования озера.

Согласно работам С.Р. Burn, С.В. Томирдиаро, Ф.Э. Арэ и др., скорость роста озер в ширину (при условии однородности залегающих мерзлых пород) происходит примерно с постоянной скоростью, испытывая лишь случайные колебания. Проведя построения аналогичные приведенным в опубликованных работах (Викторов, 1995, 2006), можно заключить, что в этом случае приращение диаметров котловин термокарстовых озер за разные сроки должно отвечать нормальному распределению. Сопоставив распределения приращения диаметров озер с нормальным распределением, мы получили хорошее согласие теоретических и экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0.99 (14 из 15) и 0.95 (12 из 15). Для участка 11 соответствие нормальному распределению также наблюдается на одном сроке, исключение из выборок слившихся озер, привело к незначительному улучшению результата.

Таким образом, полученные результаты показывают соответствие, как нормальному распределению, так и - несколько хуже - логнормальному. Это, видимо, связано с малыми временными интервалами, а также с гидрологически и геокриологически обусловленными колебаниями площади водной поверхности озер

#### **Глава IV. Оценка опасности поражения инженерных сооружений при развитии термокарстовых процессов**

Оценка риска в условиях развития опасных геологических процессов – одна из актуальных задач геоэкологии. Наиболее часто мерой риска является один из следующих параметров:

- вероятность той или иной степени поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом;
- средний риск - математическое ожидание величины поражения (например, длины) инженерного сооружения опасным геологическим процессом;
- вероятностное распределение величины поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом (общей величины поражения инженерного сооружения, величины поражения единицы длины и др.);
- предельное значение величины поражения инженерного сооружения опасным геологическим процессом.

Оценке риска поражения инженерных сооружений посвящено много исследований (В.И. Осипов, А.Л. Рагозин, А.И. Шеко, В.С. Круподеров, R.Fell, F.Nadim, J.Corominas, L.Cascini и др.). При статистическом подходе исследователь сталкивается с определенными проблемами, поскольку накопление статистики требует значительного времени, и это время зачастую сравнимо со временем

функционирования сооружения, а оценка риска нужна уже в момент проектирования сооружений. Главным и наиболее трудным этапом оценки риска является оценка вероятности поражения инженерных сооружений опасным геологическим процессом.

Мы попытались развить и обосновать способ решения данной задачи на территории озерно-термокарстовых равнин для линейных, точечных и площадных объектов с помощью методов математической морфологии ландшафта, который позволяет перейти к количественной оценке риска.

При использовании предлагаемого подхода задача оценки риска решается для однородного участка, поэтому при применении методов математической морфологии ландшафта любую неоднородную территорию надо предварительно разбить на участки однородные по условиям протекания процессов.

#### **4.1. Оценка опасности поражения линейного инженерного сооружения**

Рассмотренная выше (см. главу 2) математическая модель позволяет решать задачу о поражении рассматриваемым опасным процессом линейного объекта в однородных физико-географических условиях. Так как распределение очагов имеет распределение Пуассона, и развитие каждого очага независимо, то, как показано (Викторов, 2006), распределение числа поражений линейного объекта длиной  $L$  очагами процесса, будет представлять собой также распределение Пуассона (Викторов, 2006):

$$P(k, t) = \frac{[2\gamma(t)L\bar{r}(t)]^k}{k!} e^{-2\gamma(t)L\bar{r}(t)}, \quad (5)$$

где  $\bar{r}(t)$  - средний радиус очага в момент времени  $t$ ,  $\gamma(t)$  - средняя плотность расположения очагов в момент времени  $t$ ,  $L$  - длина объекта.

Параметр этого распределения равен произведению длины линейного сооружения на плотность распределения очагов и их средний диаметр. Отсюда А.С. Викторовым (2006) было получено, что вероятность поражения линейного объекта хотя бы одним очагом равна:

$$P_{dl}(L) = 1 - e^{-2\gamma(t)\bar{r}(t)L}. \quad (6)$$

В процессе проведенных исследований на ряде участков была проведена проверка полученных теоретических выводов.

В основу проверки выражения для оценки вероятности поражения линейного объекта, была положена следующая логика. Предположим, что мы находимся на рассматриваемом участке до начала термокарстового процесса. Так как участок однороден, то у нас нет оснований предпочесть для размещения линейного объекта какое-либо место, и он с равной вероятностью мог быть размещен в любой точке участка. Развившиеся впоследствии очаги процесса, которые в настоящее время мы наблюдаем на снимке, могли бы поразить или не поразить линейное сооружение. В

силу сказанного реальное развитие событий может быть смоделировано следующим образом - программными средствами с помощью генератора случайных чисел мы размещаем линейный объект (разной длины) случайным образом в пределах выбранного участка (с уже существующими очагами) и затем подсчитываем количество линий пораженных очагом процесса.

В соответствии с изложенным, проверка осуществлялась по следующей методике. Перед началом проверки, изучаемые озера были оцифрованы в программе «Векторизатор» и рассчитаны параметры озер. Затем, для проверки формулы вероятности поражения линейного объекта, была реализована следующая процедура: с помощью датчика случайных чисел осуществлялись серии случайных бросаний параллельных отрезков разной длины на участок прямоугольной формы с оцифрованными на ней озерами. Эти линии моделировали расположение линейного сооружения. Далее подсчитывалось количество линий, пересекших термокарстовые очаги. Полученные значения доли отрезков пораженных очагом процесса (от общего количества бросаний отрезков заданной длины) сравнивались с расчетными, определенными по указанной выше формуле. Анализ показал значительное соответствие теоретических и экспериментальных данных.

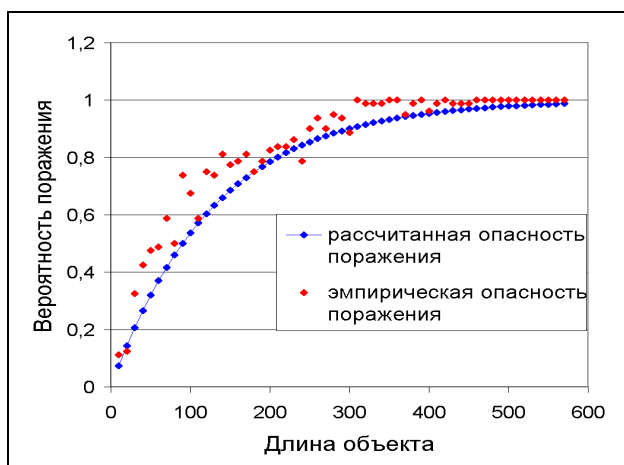


Рис. 5. Сопоставление теоретических и эмпирических значений вероятности поражения термокарстовым процессом линейного объекта разной протяженности для участка 5 после учета слияния озер.

При проведении расчетов возникли некоторые сложности, обусловленные тем, что озера могут сливаться в процессе развития, в то время как выражение получено для случая неслившихся озер. При таком слиянии, меняются параметры распределения:  $\gamma$  - средняя плотность расположения очагов, средняя площадь и средний диаметр очагов. Была сделана попытка учесть слияния озер и пересчитать их количество, «разделив» слившиеся озера. В основу разделения легла визуальная оценка таких озер. Однако, если учесть слияние при подсчете количества озер было возможно, то с пересчетом среднего диаметра и площади, возникли трудности, решение которых

предполагается в дальнейшем. Однако даже произведенная ограниченная корректировка позволяет ощутимо улучшить результат (рис. 5).

#### **4.2. Оценка опасности поражения площадного инженерного сооружения**

Методы математической морфологии ландшафта также позволяют решать задачу количественной оценки поражения озерным термокарстом площадного объекта конечных размеров. Исходя из построений модели (Викторов, 2006), вероятность поражения круговой площадки заданных размеров ( $l$ ) очагами процесса будет равна:

$$P(l) = 1 - e^{-\pi\gamma(t)[(\bar{r}(t)+l)^2 + \sigma_r^2(t)]} \quad (7)$$

где  $\sigma_r(t)$  - стандарт радиуса в момент времени  $t$ .

Измерения проводились на тех же эталонных участках. Для этого в программе «Векторизатор», выделялась область с оцифрованными озерами, и, с помощью датчика случайных чисел осуществлялись серии случайных бросаний площадных объектов (в данном случае – круга), постоянного размера. Эти площадные объекты моделировали расположение сооружений, затем подсчитывалось количество кругов, пересекших термокарстовые очаги. Для каждого участка было проведено несколько серий экспериментов, с кругами разной площади (39 выборов).

В ходе проверки теоретических предположений на исследуемых участках, на большинстве участков было получено согласие теоретических и эмпирических данных (35 из 39 выборов).

#### **4.3. Оценка опасности поражения точечного инженерного сооружения**

Если рассмотреть площадной объект малых размеров, тогда становится возможным решать задачу о вероятности поражения процессом точечного объекта (Викторов, 2006). Она может быть найдена как предел вероятности поражения объекта конечных размеров при  $l \rightarrow 0$

$$P_d(t) = 1 - e^{-\gamma(t)s(t)}, \quad (8)$$

где  $s(t)$  - средняя площадь очага в данный момент времени.

Механизм проверки схож с вариантом для площадных и линейных объектов: на выделенную область с оцифрованными озерами, с помощью датчика случайных чисел, набрасывались точечные объекты, затем подсчитывалось количество точек, находящихся внутри термокарстовых очагов.

Результаты эмпирической проверки на участках также показывают хорошее соответствие теоретических и эмпирических данных (24 из 26 выборов).

Таким образом, анализ полученных результатов показывает в целом соответствие расчетных и эмпирических данных при расчете риска для линейных, площадных и точечных объектов.



Полученные результаты позволяют эмпирически обосновать путь оценки риска поражения опасными экзогенными геологическими процессами инженерных сооружений, который включает следующие основные элементы:

- разделение неоднородного участка на однородные фрагменты;
- использование данных повторной аэро- или космической съемки с целью вычисления параметров модели;
- прогнозный расчет средней плотности расположения очагов и среднего диаметра очагов на необходимый временной срок на основе модели;
- расчет вероятности поражения объекта.

### **Основные результаты и выводы:**

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- базовые положения предлагаемой математической модели развития термокарстовых процессов для озерных термокарстовых равнин, в целом подтверждаются опытными данными;
- измерения на озерах, расположенных по полигональной решетке, не обнаружили пуассоновской закономерности в расположении озер, характерных для озерно-термокарстовых равнин;
- для исследуемых участков наиболее вероятен вариант синхронного старта процесса;
- асинхронное изменение площадей водной поверхности озер на одной площадке, позволяет исключить влияние на площадь озер метеорологических условий в конкретный год;
- рассмотрение других теорий роста площадей термокарстовых очагов (озер), выявило, что для исследуемых участков, предположение о логнормальном росте более всего отвечает экспериментальной кривой распределения площадей;
- были экспериментально проверены математические оценки вероятности поражения линейных, площадных и точечных инженерных сооружений озерным термокарстом на основе математической морфологии ландшафта;
- эмпирически обоснована возможность оценки вероятности поражения инженерных сооружений на основе повторных данных дистанционного зондирования.

В приложении диссертации представлено соответствие условий исследуемых участков и параметров модели, которое отражает влияние различных факторов на участках.

## Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

### Публикации в рецензируемых научных журналах

1. Викторов А.С., Капралова В.Н. Применение методов математической морфологии ландшафта для оценки риска поражения линейных инженерных сооружений опасными экзогенными процессами. // Геоэкология. №2 – Москва: Наука, 2011, с. 165-174.

2. Viktorov A.S., Kapralova V.N. Application of Methods of Mathematical Landscape Morphology to Assessing the Risk of Damage to Linear Engineering Structures Resulting from Hazardous Exogenous Geological Processes. // Water Resources, vol. 39, №7, 2012, pp.790-797.

3. Kapralova V.N. Application of remote sensing and mathematical morphology of landscape for studying thermokarst processes. // Landform Analysis, vol. 21, 2012, pp. 9–16.

4. Викторов А.С., Капралова В.Н. Количественная оценка природных рисков на основе материалов космических съемок (на примере озерно-термокарстовых равнин). // Исследования земли из космоса. №4 – Москва: Наука, 2013, с. 33-38.

5. Victorov A. S., Kapralova V. N. Quantitative Assessment of Natural Risks Based on Satellite Observation Data (Case Study of Thermokarst Plains). // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, vol. 49, No. 9, 2013, pp. 1069–1073.

### Публикации в других изданиях

6. Капралова В.Н. Использование данных дистанционного зондирования и методов математической морфологии ландшафта для изучения термокарстовых процессов. // Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Сергеевские чтения. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2008, с. 430-434.

7. Викторов А.С., Капралова В.Н. Изучение динамики и развития термокарстовых процессов методами математической морфологии ландшафта и дистанционного зондирования. // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии: материалы IV Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.А.Дементьева (1908-1974), Минск / редкол.: А.Н. Витченко науч.ред. и др. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2008, с. 96-98.

8. Капралова В.Н., Викторов А.С. Моделирование морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин и его геоэкологическое значение. // Моделирование при решении геоэкологических задач. Сергеевские чтения. Выпуск -11. – Москва: ГЕОС, 2009, с. 174-178.

9. Викторов А.С., Капралова В.Н. Математические модели морфологической структуры термокарстовых равнин. // Материалы Всероссийской научной конференции «Селиверстовские чтения», Санкт-Петербург, 2009, с. 152-156.

10. Kapralova V.N. Application of mathematical morphology of landscape for studying impact of climate change of permafrost rocks // 17<sup>th</sup> International Karstological School "Classical Karst", 2009, p. 69.

11. Kapralova V. Remote Sensing and Mathematical Morphology of Landscape application for Studying Thermokarst Processes. The problems of landscape ecology. Vol.XXX. Four dimensions of landscape. University of Warsaw, 2011, pp.133-139

12. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В.. Модели математической морфологии ландшафта при исследовании криолитозоны. // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (ТICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том3: Статьи на русском языке. / Под ред. В.П.Мельникова. – Тюмень, Россия: Печатник, 2012, с. 85-90.

13. Капралова В.Н., Викторов А.С.. Применение методов математической морфологии ландшафта для оценки риска поражения линейных инженерных сооружений термокарстовыми процессами. // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (ТICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том3: Статьи на русском языке. / Под ред. В.П.Мельникова. – Тюмень, Россия: Печатник, 2012, с. 217-221.

14. Викторов А.С., Капралова В.Н.. Оценка природных рисков на основе моделей морфологических структур ландшафта (на примере термокарстовых равнин). // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: Материалы Международной научно-практической конференции "ГЕОРИСК-2012", т.2, с. 21-27.

15. Viktorov A.S., Kapralova V.N.. Risk assessment based on mathematical morphology of landscape models (case study of thermokarst plains) // Geography. Environment. Sustainability, №02 [v.05], 2013, pp. 63-72.

16. Капралова В.Н., Викторов А.С. Количественные закономерности изменения размеров термокарстовых озер и оценка рисков. // Сергеевские чтения. Выпуск -15. – Москва: ГЕОС, 2013, с. 437-442.

17. Капралова В.Н.. Исследование расположения и размеров термокарстовых озер с помощью данных дистанционного зондирования и методов математической морфологии ландшафта. // Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы. Москва, 2013, с.105-108.